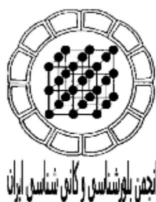
مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

سال بیست و هفتم، شمارهٔ چهارم، زمستان ۹۸، از صفحهٔ ۷۹۵ تا ۸۰۸



کانی‌شناسی و ارزیابی بوم‌شناسی فلزات سنگین در رسوب‌های سطحی دریاچه مهارلو، شیراز، ایران

امیر کریمیان طرقبه*[۱]، بیژن اعتمادی[۱]، محمدحسین محمودی قرائی[۲]، اشکان جهانداری[۳]

۱- گروه علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز

۲-گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

۳-گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان

(دریافت مقاله: ۹۷/۹/۳، نسخه نهایی: ۹۷/۱۲/۱۴)

چکیده: دریاچه مهارلو به‌عنوان بزرگ‌ترین توده آبی در همسایگی کلان‌شهر شیراز نقش بسیار مهمی را در تعدیل بوم سامانه منطقه ایفا می‌کند. در این پژوهش، کانی شناسی و غنی شدگی فلزات سنگین در رسوب‌های سطحی دریاچه مهارلو بررسی شده است. نتایج به دست آمده، ترتیب مقدار غلظت فلزات سنگین را در رسوب‌های سطحی منطقه مورد بررسی به‌صورت Sr>Ni>Cr>Zn>Cu>Co>Pb>As>Cd نشان داد. براساس نتایج پراش پرتوی x (XRD) برای رسوب‌های سطحی، فازهای کانی‌شناسی اصلی شامل آراگونیت، کلسیت، هالیت و کوارتز و به مقدار کمتر مونت موریلونیت، دولومیت و سپولیت هستند. مقایسه با دستورالعمل‌های کیفیت رسوب کانادا وضعیت به نسبت سمی را برای فلزات سنگین مورد بررسی نشان داد. همچنین بر اساس واحد سمناکی، بالاترین میزان مسمومیت‌زایی برای نیکل و کروم محاسبه شدند. براساس بررسی‌های انجام شده، مجموع بیشترین واحد سمناکی و پتانسیل خطر ممکن بوم‌شناسی همه فلزات مورد بررسی مربوط به ورودی دریاچه است که در همسایگی رودخانه خشک قرار دارد. نتایج بررسی‌های آماری نشان داد که قرار گرفتن عناصر Ni، Co و Cr با اکسیدهای اصلی کانی ساز Al_2O_3، SiO_2، K_2O، Fe_2O_3 و TiO_2 ناشی از سازند رازک بوده در حالی که ارتباط معنادار بین Sr با گوگرد و اکسیدهای کلسیم، منیزیم و سدیم نشان دهنده خاستگاه تبخیری و کربناتی این عنصر است که اغلب مربوط به سازند ساچون در منطقه مورد بررسی است. همچنین عناصر Pb، Cu، Cd، Zn و As در اثر فعالیت های انسانی پیرامون دریاچه در رسوب سطحی آن بارگزاری شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: *دریاچه مهارلو؛ رسوب سطحی؛ سازند رازک؛ سازند ساچون؛ فلزات سنگین.*

مقدمه

دریاچه‌ها یکی از مهم‌ترین و قابل‌توجه‌ترین پدیده‌ها در حفظ و تغذیه منابع آب زیرزمینی به شمار می‌روند، همچنین به‌عنوان یک عامل کلیدی در تعادل‌بخشی و تنظیم اقلیم محلی و اصلاح محیط‌زیست پیرامون خود عمل می‌کنند [۱]. در سال‌های اخیر همراه با توسعه سریع صنعتی و اقتصادی و پیامدهای آن‌ها مانند فزونی یافتن شهرنشینی، مقادیر زیادی از آلاینده‌ها در حال تخلیه به این سامانه‌های آبی هستند. به‌طورکلی، سامانه‌های آبی چون رودخانه‌ها و دریاچه‌ها از منابع اصلی تأمین‌کننده آب شرب، کشاورزی و صنعتی به شمار می‌روند. بنابراین با توجه به نقشی که آن‌ها در مسائل زیست‌محیطی پیرامون خود ایفا می‌کنند، وضعیت کیفی آن‌ها بسیار اهمیت دارد. از این رو آلودگی این محیط‌ها توسط فعالیت‌های انسان‌زاد و زمین زاد باید با دقت بالایی کنترل شود.

آلودگی عناصر با سمناکی نهفته به‌ویژه فلزات سنگین از موضوعاتی است که در سال‌های اخیر بسیار مورد استقبال

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۷۱۳۲۲۸۴۵۷۲، پست الکترونیکی: amirkarimian@shirazu.ac.ir

[DOR: 20.1001.1.17263689.1398.27.4.5.4]

[DOI: 10.29252/ijcm.27.4.795]

جوامع علمی قرارگرفته است. برای مثال، آموس و همکاران [۲] شدت آلودگی فلزات سنگین در رسوب‌های سطحی دریاچه مانزالا در مصر را بررسی کردند. آنها بیان داشتند که آلودگی فلزات سنگین در رسوب‌های این دریاچه به شدت جوامع زیستی را در معرض خطر قرار داده و نیازمند اقدامات اصلاحی و پاکسازی است. در پژوهش صورت گرفته بر دریاچه هزار در ترکیه، خاستگاه فلزات سنگین آرسنیک، کادمیم و مس را ناشی از فعالیت های کشاورزی پیرامون این دریاچه در نظر گرفته‌اند [۳]. هم چنین، بررسی‌های صورت گرفته بر تعدادی از دریاچه‌های پاکستان کودهای شیمیایی را عامل اصلی غنی شدگی فلزات سنگین در رسوب‌های آن دریاچه‌ها معرفی کرده-اند [۴]. فلزات سنگین به دلیل سمناکی، پایداری و غیرقابل تجزیه بودن به‌عنوان یکی از آلاینده‌های جدی محیط‌زیست به‌حساب می‌آیند [۵]. به‌طورکلی، منابع عمده این عناصر سمی در بوم سامانه‌های آبی منابع زمین‌زاد و انسان‌زاد هستند. منابع زمین‌زاد شامل هوازدگی و آبشویی از سنگ‌ها و منابع انسان‌زاد شامل صنایع و نیروگاه‌های تولید انرژی، سامانه‌های حمل‌ونقل مانند اگزوز خودروها، پسماندها، احتراق سوخت‌های فسیلی، کود و آفت‌کش‌های مورداستفاده شده هستند [۶]. فلزات سنگین انسان‌زاد موجود در رسوب‌ها در قیاس با فلزات با خاستگاه زمینزاد از تحرک، زیست دسترس‌پذیری و آثار سوء بیشتری بر موجودات آبزی برخوردارند [۷]. این عناصر در بوم سامانه‌های آبی می‌توانند از طریق فرایندهای زیست انباشت در موجودات زنده متمرکز شوند برای مثال، ممکن است از طریق زنجیره غذایی به بدن انسان وارد شوند و درنتیجه معضلاتی را به همراه داشته باشند [۸]. از شناخته شده عوارض تخلیه عناصر با سمناکی نهفته در سامانه‌های آبی می‌توان به بیماری میناماتا در اثر آلودگی عنصر جیوه و یا ایتای ایتای ناشی از غنی‌شدگی عنصر کادمیم در ژاپن اشاره کرد [۹].

رسوب‌ها از ابزارهای مهم طبیعی برای سنجش سلامت زیست‌محیطی بوم سامانه‌های آبی به شمار می‌روند [۱۰]. این پدیده‌های زمین‌شناسی به دلیل حضور عوامل جاذب چون کانی‌های رسی، اکسی هیدروکسیدها و یا مواد آلی ظرفیت بسیار بالایی برای انباشت مقادیر بسیار پایین و غیرقابل تشخیص فلزات سنگین از پوشش آبی خود را دارند، ازاین‌رو، نرخ غنی‌شدگی فلزات سنگین در رسوب‌ها اغلب به‌عنوان یک نشانگر برجسته از وضعیت آلودگی محیط‌های آبی به شمار می‌روند [۱۱]. در همین راستا، رسوب‌ها را می‌توان به‌عنوان مهم‌ترین انباشتگاه فلزات سنگین در محیط آبی در نظر گرفت که در پی آن به‌عنوان یک منبع بالقوه ثانویه از آلودگی فلزات سنگین در محیط‌های آبی زیرپوشش خود عمل می‌کنند [۱۲]. ازاین‌رو، فلزات سنگین در رسوبات نه‌تنها دربردارنده اطلاعات ارزشمند زمین‌شناسی و زیست‌محیطی هستند، بلکه شرایط آلودگی منطقه را نیز نشان می‌دهند [۱۳]. هرچند رسوب‌ها ظرفیت بسیار بالایی برای متمرکز کردن آلودگی دارند، ولی بیشتر آلاینده‌های جذب‌شده در آن‌ها زیست دسترس‌پذیر نیستند [۱۴]. بااین‌حال، با تغییر شرایط محیطی و رخداد برخی از فرایندها مانند بازتعلیق رسوب‌ها، واجذب، واکنش‌های اکسایشی کاهشی، تغییرات pH و یا آبشویی مواد جاذب ممکن است موجب بازنشر آلاینده‌ها در آب شود [۱۵]. این بدان معنی است که تغییر شرایط محیطی منجر به باز توزیع فلزات سنگین انباشت شده در رسوب‌ها می‌شود.

به طور کلی، ترکیب شیمیایی رسوب‌های سطحی افزون بر اینکه توسط مؤلفه‌های زمین‌شناسی چون سنگ‌شناسی، ریخت‌شناسی و یا جایگاه زمین‌ساختی حوضه آبخیز کنترل می‌شود، متأثر از فعالیت‌های انسان‌زاد نیز می‌شود [۱۶، ۱۷]. جذب، واجذب، تحرک، زیست دسترس‌پذیری و دیگر رفتارهای فلزات سنگین در بوم سامانه‌های آبگین بسیار وابسته به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی رسوب‌ها مانند pH، ترکیب شیمیایی و بافت آن‌هاست [۱۸]. بنابراین، بررسی نقش ویژگی‌های رسوب‌شناسی چون بافت و کانی‌شناسی بر رفتار فلزات سنگین در پژوهش‌های زیست‌محیطی بوم سامانه‌های آبی امری اجتناب‌ناپذیر است. به این منظور، موضوع اصلی این پژوهش بررسی خاستگاه فلزات سنگین و ارتباط آن‌ها با کانی‌شناسی رسوب‌های سطحی دریاچه مهارلو با استفاده از روش‌های آماری ضریب همبستگی، تحلیل خوشه‌ای و نیز ارزیابی سمناکی رسوب‌های دریاچه مهارلو است.

زمین‌شناسی

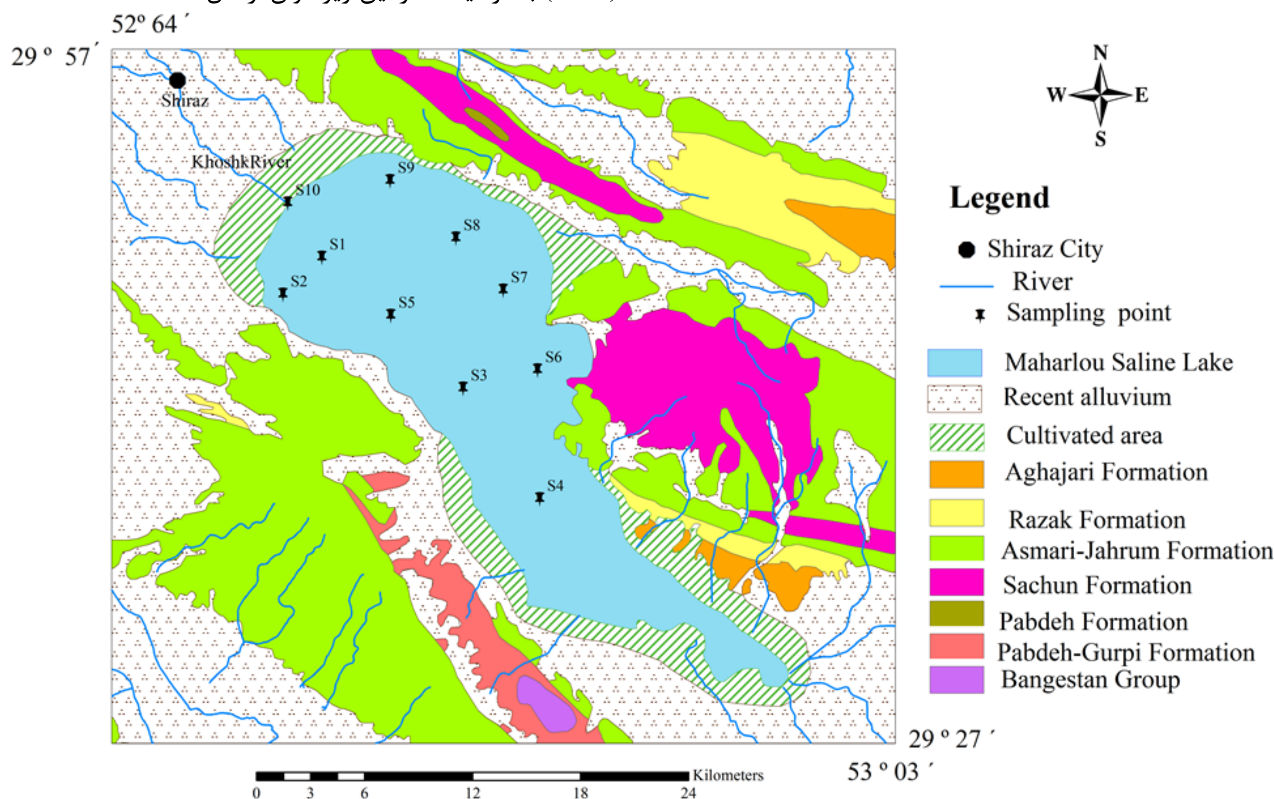
دریاچه مهارلو در ۲۳ کیلومتری جنوب شرق شیراز، یکی از مهم‌ترین بوم سامانه‌های آبی ایران است که تنوع زیستی بسیار بالایی دارد و زیستگاه مناسبی برای حیات‌وحش منطقه است. این دریاچه در معرض خطرهای متعدد و فعالیت‌های ناپایدار کننده به‌ویژه اقدام‌های مربوط به مدیریت منابع آب، برداشت نمک و آلودگی‌های شدید از منابع مختلف قرار دارد. فاضلاب‌های شهری و صنعتی و زباله‌های ریزودرشت کلان‌شهر شیراز و روستاهای اطراف دریاچه مهارلو به همراه پساب کشاورزی و رواناب‌ها با همه آلودگی و نمک‌های خود از طریق رودخانه خشک شیراز به تالاب می‌رسند.

کلان‌شهر شیراز ششمین شهر پرجمعیت ایران محسوب می‌شود. بر اساس نتایج سرشماری عمومی نفوس در سال‌های ۱۳۳۵ و ۱۳۸۵، جمعیت این شهر افزایشی ۸ برابر داشته است. این شهر فاقد سامانه یکپارچه جمع‌آوری فاضلاب شهری، صنعتی و پزشکی است و بیشتر فاضلاب این شهر از طریق زهکش‌های عبوری از میان آن (مانند رودخانه خشک) به دریاچه مهارلو می‌رسند. در محیط پیرامون دریاچه نیز کشاورزی گسترده‌ای صورت می‌گیرد.

دریاچه مهارلو ازنظر تقسیمات ساختاری در کمربند چین - رانده زاگرس قرار دارد [۱۹] و از نظر ساختاری برآمده فرونشست زمین‌ساختی است [۲۰]. با توجه به نقشه زمین‌شناسی (شکل ۱)، منطقه مورد بررسی بیشتر توسط سنگ‌های رسوبی مانند شیل، جوش سنگ، سنگ آهک و مارن احاطه‌شده است. مهم‌ترین سازندهای پیرامون این دریاچه به ترتیب از قدیم به جدید عبارتند از پابده-گورپی (مارن)، ساچون (مارن شامل سنگ گچ)، آسماری-جهرم (سنگ آهک و مارن)، رازک (مارن، ماسه سنگ و سنگ آهک)، بختیاری (جوش سنگ) و نهشته‌های آبرفتی جوان. در منطقه مورد بررسی، رودخانه دائمی وجود ندارد و دریاچه اغلب توسط چندین چشمه و رودخانه فصلی و آبراهه‌ای تغذیه می‌شود [۲۱].

نمونه‌برداری و آمایش آن‌ها

به‌منظور بررسی کانی‌شناسی و ارزیابی غلظت فلزات سنگین در رسوب‌های سطحی دریاچه مهارلو از ۱۰ نقطه مختلف اقدام به نمونه‌برداری شد. موقعیت نقاط نمونه‌برداری طوری انتخاب شدند که پوشش‌دهنده سطوح مختلف دریاچه باشند (شکل ۱). نمونه‌برداری از رسوب‌های دریاچه با استفاده از مغزه‌گیر پلی‌اتیلنی قابل‌حمل با قطر ۱۰ و طول ۲۵ سانتی‌متر صورت گرفت. نمونه‌ها پس از برداشت فوری به آزمایشگاه رسوب‌شناسی دانشگاه شیراز منتقل شدند. در آزمایشگاه نمونه‌ها پس از خشک شدن در دمای اتاق و جدایش ذرات زائد، در هاون کوبیده شده و سرانجام با الک ۶۳ میکرومتر برای اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین الک شدند. برای اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین نمونه‌ها، مقدار ۵ گرم از نمونه‌های الک و آماده شده برای انجام تجزیه‌های زمین‌شیمیایی به کانادا (آزمایشگاه MS Analytical) ارسال شد. نمونه‌ها برای تجزیه شیمیایی به ترتیب توسط اسیدهای هیدروفلوریک، پرکلریک، نیتریک و هیدروکلریک هضم شده و سپس با استفاده از طیف‌سنج جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) تجزیه شدند. همچنین تعداد ۵ نمونه به‌منظور پراش‌سنجی پرتوی X (XRD) و طیف‌سنجی فلئورسانس پرتوی X (XRF) به آزمایشگاه زمین ریزکاوان ارسال شد.



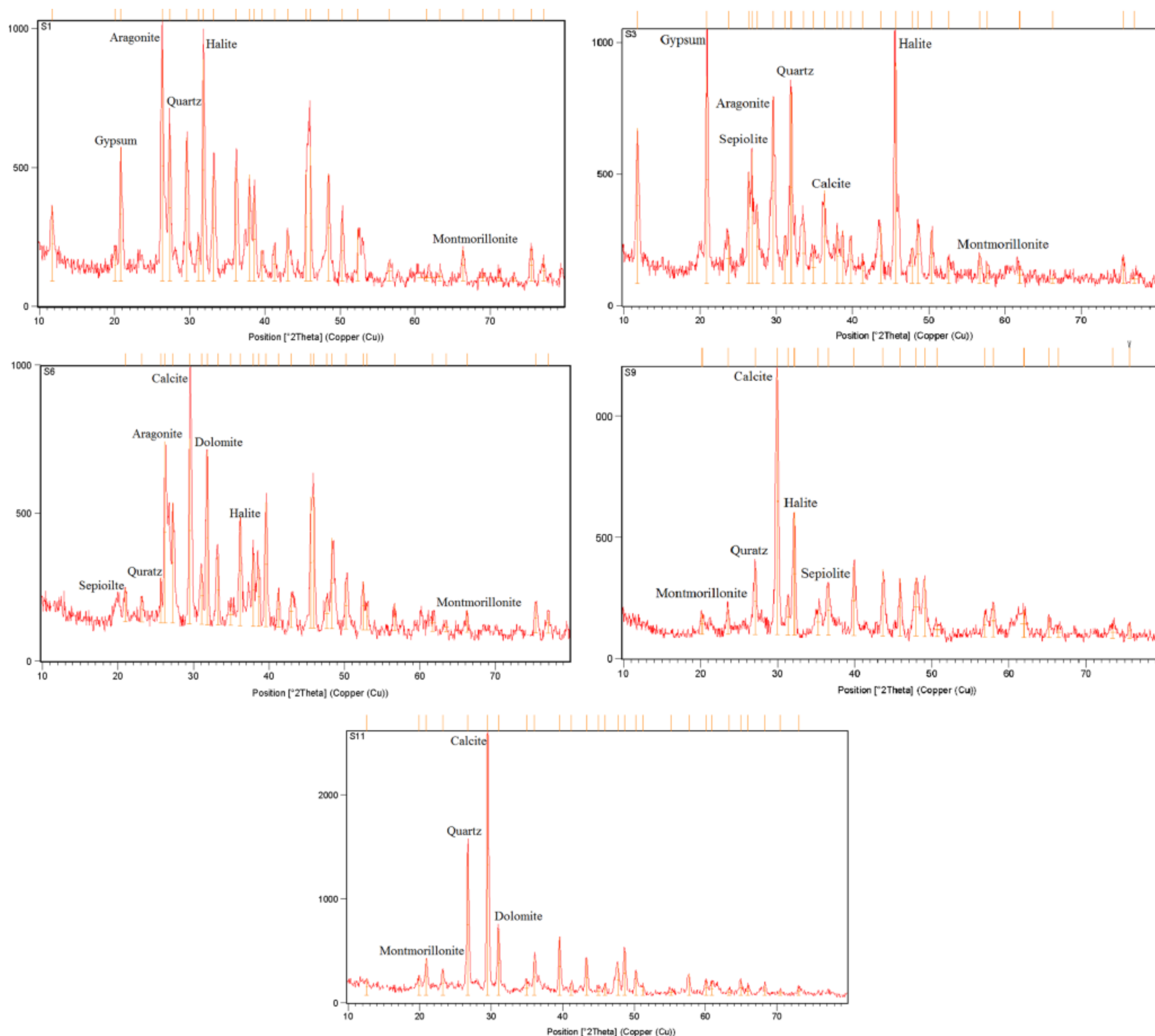
شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی و نقاط نمونه‌برداری منطقه مورد بررسی.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1398.27.4.5.4]
[DOI: 10.29252/ijcm.27.4.795]

کانی‌شناسی و اکسیدهای اصلی

نتایج کانی‌شناسی به روش XRD برای پنج نمونه رسوب سطحی دریاچه مهارلو در شکل ۲ آورده شده است. بر این اساس، مطابق با شکل ۲ کانی‌های کلسیت، سنگ گچ، هالیت، کوارتز، مونت موریلونیت، دولومیت و سپولیت در رسوب‌های سطحی دریاچه شناسایی شدند.

نتایج برآمده از XRF رسوب‌های سطحی منطقه مورد بررسی در جدول ۱ ارائه‌شده است. بر این اساس، CaO با ۲۰ تا ۲۸ درصد وزنی فراوان‌ترین اکسید اصلی است. در جایگاه بعدی، SiO_2 با ۱۴ تا ۲۹ درصد وزنی قرار دارد.



شکل ۲ طیف‌های XRD نمونه‌های رسوب سطحی دریاچه مهارلو.

جدول ۱ نتایج برآمده از XRF نمونه های رسوب سطحی دریاچه مهارلو (**برحسب درصد وزنی**)

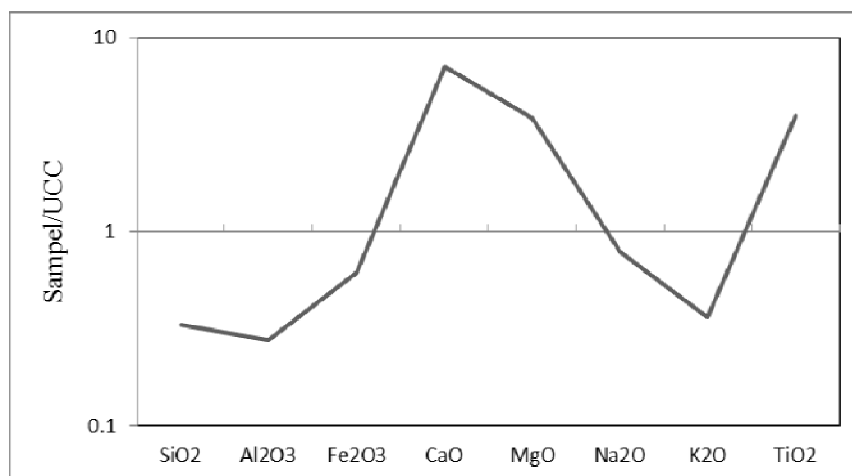
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5
میانگین	۲۱٫۹۰	۴٫۲۶	۲٫۷۰	۲۴٫۹۲	۸٫۸۵	۲٫۹۱	۱٫۱۰	۰٫۲۳	۰٫۱۲
بیشینه	۲۹٫۴۳	۶٫۳۲	۳٫۹۷	۲۸٫۷۴	۱۱٫۱۱	۴٫۸۳	۱٫۶۴	۰٫۳۶	۰٫۱۷
کمینه	۱۴٫۰۹	۲٫۴۳	۱٫۰۹	۲۰٫۴۶	۶٫۶۲	۰٫۷۰	۰٫۲۷	۰٫۱۱	۰٫۰۷
UCC	۶۶	۱۶	۳٫۴۲	۳٫۵	۲٫۳	۳٫۸	۳٫۳	۰٫۰۶	–

به‌منظور درک بهتر وضعیت اکسیدهای اصلی در رسوب‌های منطقه مورد بررسی، میانگین آن‌ها با فراوانی پوسته بالایی آن‌ها (UCC) مقایسه شد [۲۲] (شکل ۳). نتایج به‌دست‌آمده بیانگر تهی شدگی SiO_2، Al_2O_3، Na_2O و K_2O و نیز غنی‌شدگی CaO و MgO است. تهی‌شدگی ترکیب‌های نام برده و نیز غنی‌شدگی اکسیدهای کلسیم و منیزیم در مقایسه با میانگین پوسته‌ای خود ناشی از فراوانی کانی‌های کربناتی و سولفاتی در سنگ‌های منطقه مورد بررسی است. همچنین غنی‌شدگی Na_2O در رسوبات سطحی دریاچه مهارلو را می‌توان به تشکیل لایه نمک مستقل از فاز رسوب در دریاچه نسبت داد.

غلظت فلزات سنگین در رسوبات دریاچه مهارلو

نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین در جدول ۲ ارائه‌شده است. باتوجه به شکل ۴، غلظت میانگین فلزات سنگین نمونه‌های رسوب سطحی دریاچه مهارلو از توالی Sr> Ni> Cr> Zn> Cu> Co> Pb> As> Cd پیروی می‌کند. بالاترین غلظت استرانسیم و آرسنیک در ایستگاه شماره ۱ واقع در شمال غرب دریاچه دیده شد، درحالی‌که کادمیم، سرب، مس و روی بیشترین غلظت را در ایستگاه شماره ۱۰ (واقع در شمال دریاچه، محل ورود رودخانه خشک به دریاچه) در همسایگی رودخانه خشک نشان دادند. بیشترین غلظت نیکل و کروم نیز در ایستگاه شماره ۷ (واقع در شمال شرق دریاچه) اندازه‌گیری شد.

به‌منظور ارزیابی میزان آلودگی هر عنصر، مقادیر اندازه‌گیری شده با فراوانی پوسته قاره‌ای بالایی (UCC) و گستره مرسوم فلزات جزئی رسوب‌های دریاچه‌ای (WCTMRL) مقایسه شد [۲۲، ۲۳]. چنان که در جدول ۲ دیده می‌شود، میانگین همه فلزات سنگین اندازه‌گیری شده جز کبالت و سرب بیش از مقادیر ارائه‌شده UCC است. میزان غنی‌شدگی عناصر استرانسیم، نیکل، آرسنیک و مس به ترتیب ۱۲، ۵، ۳ و ۲ برابر بیش از مقادیر UCC برآورد شد، در صورتی که در مقایسه با گستره مرسوم فلزات جزئی در رسوب‌های دریاچه‌ای، تنها مس و استرانسیم مقادیر فراتر از این استاندارد را نشان دادند.

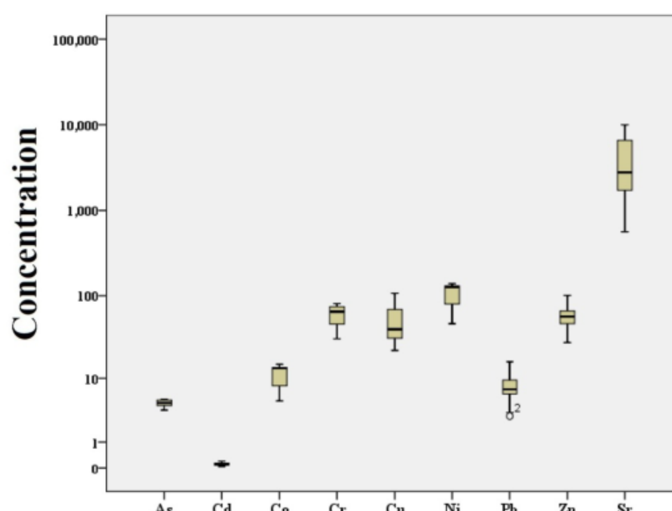


شکل ۳ مقایسه میانگین مقادیر اکسید های اصلی در ۵ نمونه از رسوب‌های سطحی دریاچه مهارلو با فراوانی آنها در پوسته بالایی زمین (UCC).

جدول ۲ نتایج تجزیه شیمیایی عناصر در رسوب‌های سطحی دریاچه مهارلو (برحسب mg/kg؛ سدیم و گوگرد بر حسب ٪).

	As	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Sr	Na	S
میانگین	۴٫۶	۰٫۱	۱۰٫۹	۶۰٫۸	۵۱٫۳	۱۰۴٫۹	۸٫۰	۵۸٫۱	۴۱۷۲٫۵	۳٫۱	۱٫۲۴
بیشینه	۵٫۳	۰٫۲۰	۱۵٫۲	۸۱٫۰	۱۰۷٫۰	۱۳۸٫۹	۱۶٫۳	۱۰۱٫۰	۱۰۰۰۰	۵٫۸۱	۴٫۳۴
کمینه	۳٫۷	۰٫۰۴	۵٫۰	۳۱٫۰	۲۲٫۵	۴۷٫۰	۳٫۰	۲۸٫۰	۵۶۵٫۰	۰٫۱۶	۰٫۰۸
UCC	۱٫۵	۰٫۰۹	۱۷	۳۵	۲۵	۲۰	۲۰	۷۱	۳۵۰	–	–
WCTMRL	–	۱٫۵-۰٫۱	–	۱۹۰-۲۰	۹۰-۲۰	۲۵۰-۳۰	۱۰۰-۱۰	۲۵۰-۵۰	۷۵۰-۶۰	–	–

[DOR: 20.1001.1.17263689.1398.27.4.5.4]
[DOI: 10.29252/ijcm.27.4.795]



شکل ۴ نمودار جعبه ای غلظت عناصر اندازه‌گیری شده در نمونه‌های رسوب سطحی دریاچه مهارلو.

ارزیابی آلودگی و سمناکی رسوب‌های

شاخص زمین انباشت یکی از کاربردی‌ترین شاخص‌های زیست‌محیطی به منظور تعیین درجه آلودگی رسوب‌های است که برای نخستین بار توسط مولر در سال ۱۹۶۹ به صورت زیر معرفی شد [۲۴]:

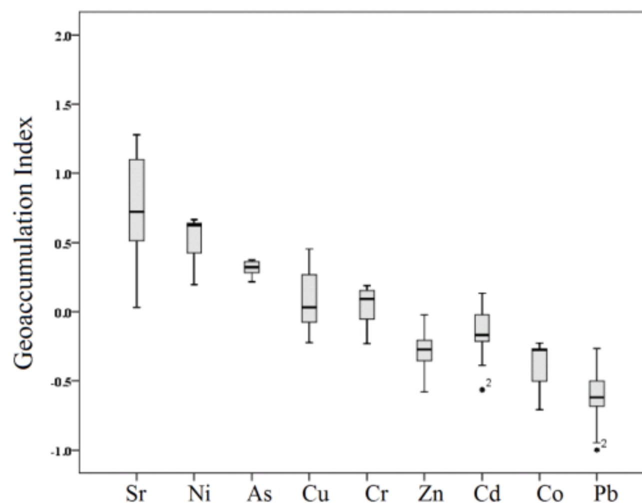
$$Igeo= Log2\frac{[Cn]}{1.5[Bn]} \quad (۱)$$

در این رابطه، Cn غلظت عنصر مورد نظر در نمونه و Bn مقدار همان عنصر در نمونه مرجع، استاندارد یا زمینه محلی است کـه در این پژوهش از مقادیر UCC استفاده شد [۲۲]. ضـریب ۱٫۵ در این رابطه به عنوان عامل تصحیح یا شار زمین‌شناسی عناصر در نظر گرفته می‌شود [۲۴]. نتایج به دست آمده برای شـاخص زمین انباشت در رده‌های متفاوتی قرار می‌گیرند (جدول ۳).

مقادیر محاسبه شده شاخص زمین انباشت در شکل ۵ ارائه شده است. روند کاهشی این شاخص عبارت است از استرانسیم (با میانگین ۰٫۷۶)، نیکل (با میانگین ۰٫۵۱)، آرسنیک (با میانگین ۰٫۳۱)، مس (با میانگین ۰٫۰۸)، کروم (با میانگین ۰٫۰۴)، کادمیم (با میانگین ۰٫۱۴-)، روی (با میانگین ۰٫۲۹-)، کبالت (با میانگین ۰٫۳۹-) و سرب (با میانگین ۰٫۶۹-). مقادیر شاخص زمین انباشت برای عنصر کروم در نمونه‌های شماره ۱ (شمال دریاچه)، ۲ (شمال غرب دریاچه)، ۳ (غرب دریاچه) و ۵ (غرب دریاچه)، برای عنصر مس در نمونه‌های شماره ۱ (شمال دریاچه)، ۲ (شمال غرب دریاچه)، ۴ (جنوب دریاچه در همسایگی زمین‌های کشاورزی) و ۷ (شرق دریاچه)، برای عنصر کادمیم همه نمونه‌ها به جز نمونه‌های شماره ۴ و ۱۰ (محل ورود رودخانه خشک به دریاچه) و سرانجام برای عناصر سرب، روی و کبالت در همه نمونه‌ها کمتر از صفر محاسبه شد که نشانگر آلوده نبودن آنهاست. این شاخص برای عناصر آرسنیک و نیکل برابر با یک براورد شد که بیانگر نا آلودگی تا آلودگی خفیف آنها است. در بین نقاط نمونه‌برداری، بیشینه مقدار شاخص زمین انباشت عناصر مورد بررسی در همسایگی رودخانه خشک یعنی ایستگاه شماره ۱۰ به دست آمد. در بین ۹ عنصر مورد بررسی، استرانسیم بیشترین آلودگی را از خود نشان داد.

جدول ۳ شدت آلودگی نمونه‌های رسوب بر اساس شاخص زمین انباشت (Igeo)

مقدار Igeo	رده‌Igeo	درجه آلودگی Igeo
۰	۱	غیرآلوده
۰-۱	۲	غیرآلوده تا کمی آلوده
۱-۲	۳	آلودگی متوسط
۲-۳	۴	آلودگی متوسط تا زیاد
۳-۴	۵	آلودگی زیاد
۴-۵	۶	آلودگی زیاد تا شدید
بیش از ۵	۷	به شدت آلوده



شکل ۵ نمودار جعبه ای شاخص زمین انباشت (Igeo) عناصر مورد بررسی در رسوب‌های سطحی دریاچه مهارلو.

یکی از روش‌های متداول در سنجش وضعیت سمناکی آلاینده‌ها استفاده از شاخص‌های کیفیت رسوب (SQG)[1] است، که در آن نتایج به دست آمده با مقادیر مرجع مقایسه می‌شود تا میزان تهدید سمناکی رسوب به جوامع زیستی مشخص شود [۲۵]. این شاخص‌ها بیشتر برای توده‌های آب شیرین که محیطی مستعد برای زیست آبزیانی چون ماهی‌ها هستند به کار می‌رود. با این‌حال، در این پژوهش به‌منظور دستیابی به دیدی کلی از میزان سمناکی فلزات سنگین رسوب‌های دریاچه مهارلو از این شاخص‌ها استفاده شد. بر این اساس، شاخص‌های کیفیت رسوب کانادا (SQGs) و اداره ملی اقیانوسی و جوی آمریکا (NOAA[2]) به کار گرفته شد [۲۶]. این دو شاخص عبارتند از نسبت حد اثر متوسط به حد اثر کم (ERM/ERL)[3] و نسبت سطح اثر احتمالی به سطح اثر آستانه[4] (PEL/TEL). گستره آثار کم (ERL) و TEL نشانگر مقادیری هستند که کمتر از آن احتمال بروز آثار مضر بر روی جوامع زیستی وجود ندارند، درحالی‌که گستره آثار متوسط (ERM) و PEL غلظت‌هایی را نشان می‌دهند که بالاتر از آن آثار جانبی بر این جوامع قابل‌مشاهده است [۲۷، ۲۸]. برای به دست آوردن مقادیر واقع بینانه‌تر از اثر گذاری سمناکی رسوب‌ها بر موجودات زنده از روابط زیر استفاده شد:

$$PEL=\frac{\sum_{i=1}^{n} M_i/PEL_i}{n} \qquad (۲)$$

$$ELMQ=\frac{\sum_{i=1}^{n} M_i/ELM_i}{n} \qquad (۳)$$

که در این روابط، M_i غلظت فلز سنگین i در رسوب، PEL_i و ERM_i به ترتیب سطح احتمالی غلظت مؤثر و حد متوسط غلظت مؤثر برای آلاینده i در رسوب و n تعداد آلاینده‌های موردبررسی در هر نمونه است. این شاخص‌ها میزان سمناکی رسوب‌ها را به ۵ رده تفکیک می‌کند: غیر سمی (PEL<۰/۱ و ERMQ)، به نسبت سمی (PEL<۱/۵ و ERMQ>۰/۱)، سمناکی متوسط (۰/۵<ERMQ<۱/۵ و ۱/۵< PEL< ۲/۳) و سمناکی شدید (ERMQ > ۱/۵ و PEL> ۲/۳) [۸ و ۱۶].

واحد سمناکی از شاخص‌های دیگر ارزیابی سمناکی رسوب است که از نسبت غلظت فلزات اندازه‌گیری شده به سطح اثر احتمالی(PEL) به دست می‌آید [۲۵، ۲۹] در این راستا، سمناکی ممکن رسوب در هر ایستگاه را می‌توان برپایه رابطه زیر از مجموع واحدهای سمناکی محاسبه کرد [۱۵].

$$\sum TUs = (TU\ As + TU\ Cd + TU\ Co + TU\ Cu + TU\ Ni + TU\ Pb + TU\ Zn + TU\ Sr) \qquad (۴)$$

مقادیر میانگین $\sum TU$ فلزات سنگین در رسوب‌ها کمتر از ۴ سمناکی متوسط و مقادیر بیش از ۶ سمناکی قابل‌توجه را نشان می‌دهد [۱۱]. در این پژوهش، برای ارزیابی پتانسیل خطرهای بوم‌شناسی فلزات سنگین در رسوب دریاچه مهارلو از شاخص خطر نهفته بوم‌شناسی (RI)[5] استفاده شد. این شاخص که بر اساس ویژگی‌ها و رفتار زیست‌محیطی فلزات سنگین است، برای نخستین بار توسط هاکنسون به صورت زیر ارائه شد [۳۰]:

$$RI=\sum_{i=1}^{n} E_r{}^{i} = \sum_{i=1}^{n} T^{i} \times c_f{}^{i} = \sum_{i=1}^{n} T^{i} \times \left(\frac{C^{i}}{C^{i}_{b}}\right) \qquad (۵)$$

1- Sediment quality guidelines
2- National Oceanic and Atmospheric Administration
3- Effects range low/median
4- Threshold/probable effect level

5- The potential ecological risk index

[DOR: 20.1001.1.17263689.1398.27.4.5.4]
[DOI: 10.29252/ijcm.27.4.795]

در این رابطه، E^i_r پتانسیل خطرهای نهفته بوم‌شناسی فلز سنگین i، T^i_r شاخص سمی فلز سنگین i (Cd=۳۰، Cr=۲، Cu=۵، Pb=۵، Ni=۲، As=۱۰، Mo=۱۵ و Zn=۱)، C^i_f نسبت آلودگی فلز سنگین i، C_i غلظت فلز سنگین i اندازه‌گیری شده و C_{bi} مقدار زمینه‌ای فلز سنگین i است [۳۰]. رده‌بندی سمناکی رسوب برحسب RI و E^i_r در جدول ۴ ارائه‌شده است.

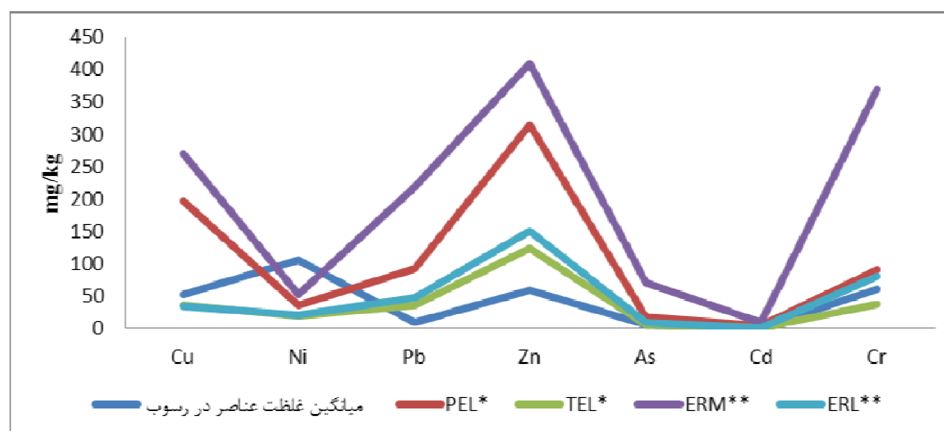
برای ارزیابی سمناکی بوم‌شناسی عناصر مورد بررسی در رسوب دریاچه مهارلو با استانداردهای NOAA و SQGs مقایسه شد که نتایج آن در شکل ۶ ارائه شده است. میانگین غلظت عناصر سرب، روی، آرسنیک و کادمیم در رسوب دریاچه مهارلو کمتر و برای نیکل بیشتر از مقادیر ERL، ERM، TEL و PEL است. میانگین غلظت مس و کروم کمتر از PEL و ERM و بیشتر از TEL و ERL است.

نتایج سطح اثر احتمالی و حد اثر متوسط (شکل ۷) نشان داد که رسوب‌های سطحی دریاچه مهارلو به عناصر As، Cd، Cu، Cr، Ni، Pb و Zn در وضعیت به نسبت سمی قرار دارند. میانگین واحدهای سمناکی عناصر As، Cd، Cu، Cr، Ni، Pb و Zn به ترتیب ۰٫۲۷، ۰٫۰۳، ۰٫۲۵، ۰٫۶۶، ۲٫۸۳، ۰٫۰۷ و ۰٫۱۷ است (شکل ۸). بنابراین بیشترین سمناکی مربوط به عنصر نیکل و در جایگاه بعدی کروم است. بیشترین واحد سمناکی فلزات سنگین با میانگین ۵٫۳ مربوط به نمونه شماره ۱۰ است که در همسایگی رودخانه خشک قرار دارد (ورودی دریاچه). میانگین $\sum TU$ برای کل نمونه‌ها ۴٫۱۵ است که بالاتر از گستره سمناکی متوسط (۴) و در گستره پایین‌تر از سمناکی قابل‌توجه (۶) قرار دارد [۲۵].

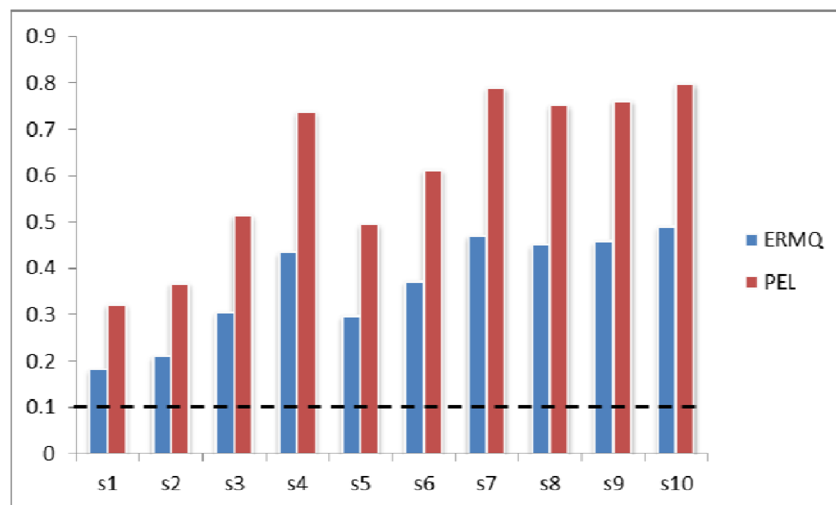
مقادیر E_i و RI برای هفت فلز سنگین آرسنیک، کادمیم، کروم، مس، نیکل، سرب و روی محاسبه شد و نتایج آن در شکل ۹ ارائه شده است. آرسنیک در نمونه‌های شماره ۱، ۳، ۴، ۷، ۹، ۱۰ و ۱۱ با شاخص خطر نهفته بوم‌شناسی بیش از ۳۰ و کمتر از ۵۰ سمناکی متوسطی را نشان دادند و سایر نقاط نمونه‌برداری از سمناکی کمی برخوردارند. در بین فلزات سنگین مورد بررسی در رسوب دریاچه مهارلو، عنصر کادمیم سمناکی بیشتری را بروز می‌دهد که بیشترین آن در نمونه شماره ۱۰ با مقدار برابر با E_i ۶۱٫۲ به دست آمد. کادمیم در ایستگاه‌های ۱(شمال دریاچه)، ۲(شمال غرب)، ۶(شرق دریاچه) و ۹ (شمال شرق دریاچه) میزان سمناکی کمی دارند و در سایر نقاط نمونه‌برداری شده، در وضعیت سمناکی متوسط قرار دارد. مقادیر محاسبه‌شده شاخص خطر نهفته بوم‌شناسی برای سایر فلزات سنگین کمتر از۳۰ است که نشانگر سمناکی کم این عناصر در رسوب‌های سطحی منطقه مورد بررسی است.

جدول ۴ رده بندی مقادیر RI و E^i_r.

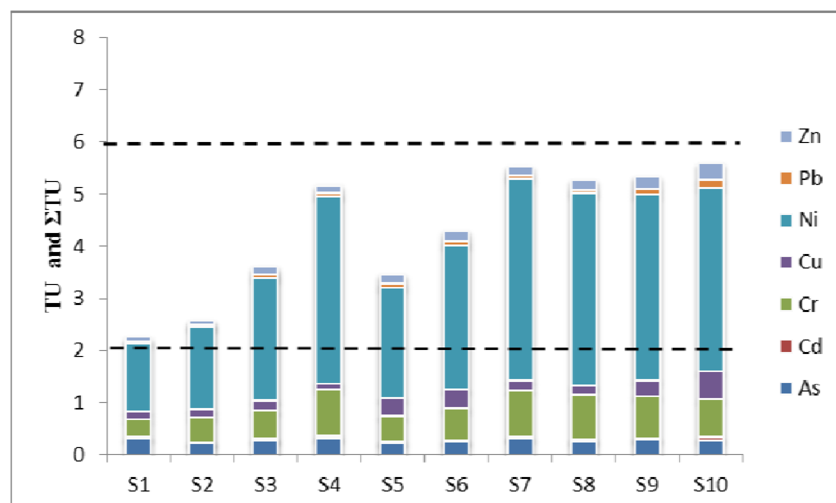
RI		E^i_r	
گستره	درجه سمناکی	گستره	درجه سمناکی
کمتر از ۵۰	کم	کمتر از ۳۰	کم
۵۰ تا کمتر ۱۰۰	متوسط	۳۰ تا کمتر از ۶۰	متوسط
۱۰۰ تا کمتر از ۲۰۰	زیاد	۶۰ تا کمتر از ۱۲۰	قابل‌توجه
بیش از ۲۰۰	بسیار زیاد	۱۲۰ تا کمتر از ۲۴۰	زیاد
		بیش از ۲۴۰	بسیار زیاد



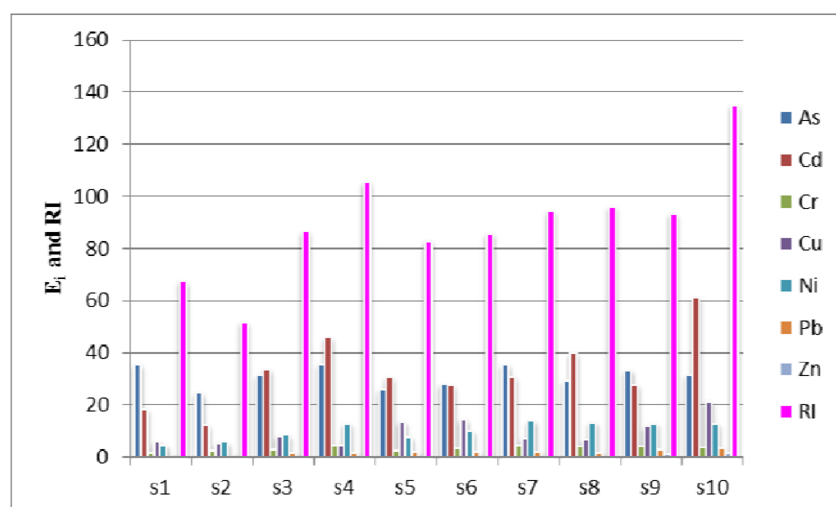
شکل ۶ مقایسه میانگین غلظت عناصر انتخابی در رسوب با مقادیر PEL و TEL.



شکل ۷ نمودار ERMQ و PEL برای عناصر As، Cd، Cu، Cr، Pb، Ni و Zn در نقاط نمونه‌برداری شده.



شکل ۸ نمودار واحد سمناکی رسوب‌های منطقه مورد بررسی.



شکل ۹ مقادیر پتانسیل خطرهای نهفته بوم شناسی (Ei) و شاخص خطر نهفته بوم شناسی (RI) نمونه های رسوب دریاچه مهارلو

شاخص خطر نهفته بوم‌شناسی (RI) نشان‌دهنده حساسیت جوامع زیستی مختلف به مواد سمی و خطرهای نهفته زیست‌محیطی فلزات سنگین است [۱۱]. بر اساس مقادیر محاسبه‌شده RI برای نمونه‌های رسوب دریاچه مهارلو، ایستگاه‌های شماره ۴ و ۱۰ با RI بیش از ۱۰۰ سمناکی زیادی را از خود نشان دادند. شاخص خطر نهفته بوم‌شناسی در سایر نمونه‌ها کمتر از ۱۰۰ و بیشتر از ۵۰ است که نشان‌دهنده میزان سمناکی متوسط است.

برای بررسی روابط بین عناصر اصلی، فلزات سنگین و کانی‌شناسی رسوب‌ها از روش آماری چند متغیره ضریب همبستگی و تحلیل خوشه‌ای استفاده شد. این روش‌ها ابزاری قدرتمند برای کشف روابط پنهان بین متغییرهاست که از طریق روش‌های آماری دیگر قابل شناسایی نیستند. بنابراین برای درک بهتر روابط بین فلزات سنگین و اکسیدهای اصلی از این دو روش آماری استفاده شد. به این منظور برای بررسی ارتباط بین پارامترهای مورد نظر، ضریب همبستگی پیرسون محاسبه گردید. همچنین از تحلیل خوشه‌ای به روش ارتباط میان گروه ها و ضریب همبستگی پیرسون برای شناسایی بهتر خاستگاه فلزات سنگین استفاده شد. همه این روش‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS.19 انجام شدند.

در این جا نخست برای آشکار شدن روابط بین فلزات سنگین در رسوب‌های سطحی از آزمون ضریب همبستگی استفاده شد و سرانجام به منظور پی بردن به خاستگاه احتمالی فلزات سنگین و ارتباط آن‌ها با کانی‌شناسی رسوب‌های سطحی دریاچه مهارلو، غلظت فلزات سنگین و اکسیدهای اصلی با استفاده از روش تحلیل خوشه‌ای پردازش گردید. نتایج برآمده از ضریب همبستگی پیرسون در جدول ۵ ارائه شده است. دیده می‌شود که غلظت آرسنیک با هیچ یک از عناصر دیگر رابطه معناداری ندارد. این امر نشان می‌دهد که عنصر آرسنیک در رسوب‌های سطحی دریاچه مهارلو دارای خاستگاهی بی‌مانند است. در بیشتر نقاط دنیا، آلودگی آرسنیک ارتباط بسیار نزدیکی با فعالیت‌های کشاورزی دارد، چرا که در اثر استفاده از آفت‌کش‌ها، علف‌کش‌ها و یا کودهای شیمیایی در محیط دچار غنی‌شدگی می‌شود [۷]. وجود فعالیت‌های گسترده کشاورزی پیرامون دریاچه مهارلو می‌تواند تأییدی بر وابستگی احتمالی عنصر آرسنیک به فعالیت‌های کشاورزی اطراف دریاچه باشد. همبستگی مثبت و معنادار بین عناصر سرب، روی، کادمیم و مس بیانگر خاستگاه یکسانی برای این عناصر است. همچنین ارتباط معنادار مثبت بین عناصر Ni، Co و Cr دیده شد.

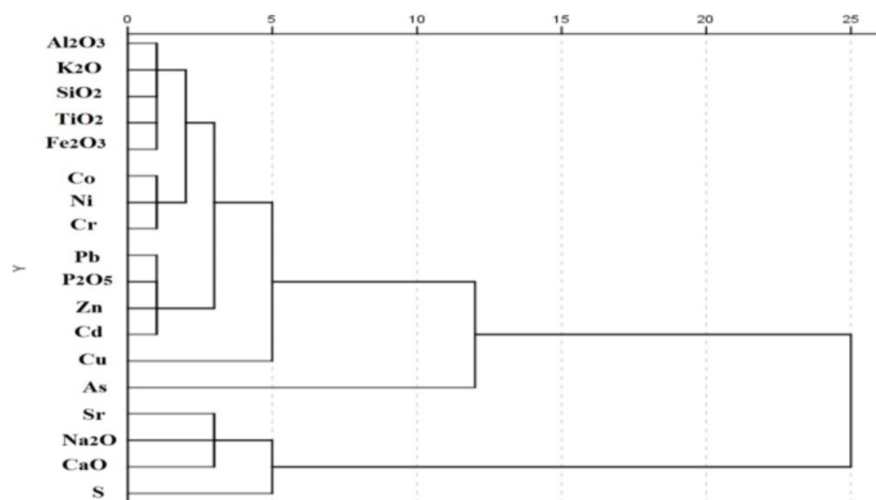
به منظور شناسایی بهتر خاستگاه احتمالی فلزات سنگین از تحلیل خوشه‌ای نیز بهره گرفته شد که نتایج آن به صورت نمودار درختی در شکل ۱۰ ارائه شده است. براساس این شکل، پارامترهای مورد پردازش در دو خوشه اصلی قرار می‌گیرند.

جدول ۵ نتایج ضریب همبستگی.

	As	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Sr
As	۱								
Cd	۰٫۲۹	۱							
Co	۰٫۴۱	۰٫۶۸×	۱						
Cr	۰٫۴۶	۰٫۵۵	۰٫۹۵××	۱					
Cu	-۰٫۱۸	۰٫۵۶	۰٫۲۴	۰٫۲۹	۱				
Ni	۰٫۴۱	۰٫۷۰×	۰٫۹۸××	۰٫۹۵××	۰٫۲۶	۱			
Pb	۰٫۱۷	۰٫۷۳××	۰٫۶۱×	۰٫۴۶	۰٫۷۲×	۰٫۶۳×	۱		
Zn	۰٫۰۹	۰٫۸۲××	۰٫۶۵×	۰٫۴۷	۰٫۸۵××	۰٫۶۷×	۰٫۹۲××	۱	
Sr	-۰٫۲۵	-۰٫۷۱	-۰٫۹۲	-۰٫۸۹	-۰٫۲۹	-۰٫۹۰	-۰٫۶۴	-۰٫۷۱	۱

[DOR: 20.1001.1.17263689.1398.27.4.5.4]
[DOI: 10.29252/ijcm.27.4.795]

[DOR: 20.1001.1.17263689.1398.27.4.5.4]
[DOI: 10.29252/ijcm.27.4.795]



شکل ۱۰ تحلیل خوشه ای عناصر و اکسید های اصلی نمونه های رسوب دریاچه مهارلو

خوشه نخست شامل Sr، Na_2O، CaO و S است. خوشه دوم به چندین زیرگروه تقسیم می‌شود که عبارتند از ۱) SiO_2، Al_2O_3، Fe_2O_3، K_2O و زیرگروه Ni، Cr و Co، ۲) شامل Pb، Cd، Zn، Cu، Ni و اکسید P_2O_5 و ۳) عنصر آرسنیک. به طور کلی بر پایه نتایج به دست آمده از آزمون ضریب هبمستگی، سه روند متفاوت را در رابطه با خاستگاه احتمالی فلزات سنگین می‌توان در نظر گرفت که در ادامه بیان می‌شوند. ارتباط معنادار فلزات سنگین در گروه نخست با اکسیدهای رایج کانی‌ساز نشان‌دهنده خاستگاه زمین‌زاد این عناصر است. گزارش‌های منتشر شده پیرامون منطقه مورد بررسی که سازند رازک را دارای غلظت بالایی از فلزات سنگین نیکل و کروم معرفی می-کنند این امر را تائید می‌کنند [۳۱، ۳۲]. روند معنادار فلزات سنگین موجود در گروه دوم را می‌توان به خاستگاه انسان‌زاد آن‌ها نسبت داد. ارتباط قوی بین Pb، Cd، Cu و Zn را می‌توان به منابع غیر نقطه‌ای شهری مانند رواناب‌های شهری تخلیه‌شده از رودخانه خشک به دریاچه و یا گسیل‌های ترافیکی از شهر شیراز نسبت داد[۳۳]. همچنین حضور Cd و P_2O_5 در یک خوشه ناشی از فعالیت‌های کشاورزی پیرامون دریاچه است. کادمیم اغلب به‌عنوان یک پیش‌نشانگر فعالیت‌های کشاورزی در نظر گرفته می‌شود، چرا که از اجزای اصلی کودهای فسفاتی به شمار می‌رود [۳۴]. بنابراین کادمیم افزون بر خاستگاه شهری، در اثر فعالیت‌های کشاورزی نیز در رسوب سطحی دریاچه مهارلو بارگذاری شده است. حضور آرسنیک در این خوشه نشان‌دهنده خاستگاه انسان‌زاد این عنصر است، اما ارتباط ضعیف آن با سایر فلزات نشان‌دهنده خاستگاهی متفاوت از سایر فلزات سنگین این خوشه است. برپایه توزیع جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری (جدول ۲ و شکل ۱)، غلظت آرسنیک در گستره‌های نزدیک به زمین‌های کشاورزی بیش از سایر نقاط دریاچه است بنابراین خاستگاه این عنصر احتمالاً ناشی از فعالیت‌های کشاورزی پیرامون دریاچه مهارلو است.

گروه سوم (Sr، S، CaO، MgO و Na_2O) بازتاب‌دهنده سنگ‌های رسوبی میزبان در منطقه مورد بررسی است. سازند تبخیری ساچون نقش مهمی در رسوب‌گذاری این منطقه دارد [۳۵]. غلظت استرانسیم و سدیم در این سازند به ترتیب در گستره‌های ۹۰ تا ۸۹۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و ۲۵۰ تا ۸۲۷۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم تغییر می‌کند [۳۶]. بنابراین ارتباط استرانسیم با گوگرد و اکسیدهای کلسیم، منیزیم و سدیم بیانگر ارتباط خاستگاه Sr با کانی‌های تبخیری چون سنگ گچ و کانی‌های کربناتی کلسیت و دولومیت در سنگ میزبان کربناتی منطقه مورد بررسی است.

برداشت

موضوع اصلی این پژوهش بررسی نقش سازندهای زمین‌شناسی در غنی‌شدگی فلزات سنگین در رسوب‌های سطحی دریاچه مهارلو به همراه ارزیابی بوم‌شناسی این آلاینده‌ها بوده است. براساس نتایج کانی‌شناسی، آراگونیت، کلسیت، هالیت، کوارتز و سنگ گچ فازهای اصلی کانیایی در رسوب‌های سطحی منطقه

مورد بررسی هستند. همه فلزات سنگین مورد بررسی به‌جز سرب و کبالت در مقایسه با فراوانی عناصر در پوسته بالایی غنی‌شدگی نشان می‌دهند. در این مورد، استرانسیم با ۱۲ برابر غنی‌شدگی در جایگاه نخست و عناصر نیکل، آرسنیک و مس به ترتیب با ۵، ۳ و ۲ برابر غنی‌شدگی در جایگاه‌های بعدی قرار دارند. بر اساس مقادیر سطح اثر احتمالی و حد اثر متوسط میانگین، غلظت عناصر سرب، روی، آرسنیک و کادمیم در رسوب دریاچه مهارلو کمتر و نیکل بیشتر از مقادیر ERL، ERM، TELو PEL است. نتایج واحد سمناکی (TU) نشان داد که در رسوب سطحی دریاچه مهارلو، بیشترین سمناکی مربوط به عنصر نیکل و در جایگاه بعدی کروم است. در بین نقاط نمونه‌برداری شده، بالاترین واحد سمناکی فلزات سنگین مربوط به نمونه شماره ۱۰ (شمال دریاچه) با میانگین ۵/۳ است که در همسایگی رودخانه خشک قرار دارد (ورودی دریاچه). بر پایه شاخص خطر نهفته بوم‌شناسی نمونه‌های رسوب منطقه مورد بررسی، ایستگاه شماره ۴ (جنوب دریاچه-در همسایگی زمین های کشاورزی) و ۱۰ (شمال دریاچه، محل ورود رودخانه خشک به دریاچه) با RI بیش از ۱۰۰ درجه سمناکی زیادی را از خود نشان دادند. این شاخص برای سایر ایستگاه‌های نمونه‌برداری شده کمتر از ۱۰۰ و بیش‌تر از ۵۰ به دست آمد که بیانگر مسمومیت‌زایی پایین آن‌هاست. نمونه‌های شماره۲ (شمال غرب دریاچه)، ۳ (غرب دریاچه)، ۵ (شمال غرب دریاچه)، ۶ (شرق دریاچه)، ۸ (شمال شرق) و ۹ (شمال شرق دریاچه) درجه سمناکی بالایی دارند و سایر ایستگاه‌ها سمناکی متوسطی را نشان دادند. نتایج ضریب همبستگی و تحلیل خوشه‌ای برای غلظت فلزات سنگین و اکسیدهای اصلی نمونه‌های رسوب سه روند کلی را نشان دادند. نخست، همراهی عناصر نیکل، کروم و کبالت با اکسیدهای اصلی کانی‌ساز SiO_2، Al_2O_3، Fe_2O_3، K_2O و TiO_2 گویای خاستگاه زمین‌زاد آن‌هاست که با توجه به غلظت بالای این عناصر در سازند رازک، می‌توان خاستگاه آن‌ها را به این سازند نسبت داد. در گروه دوم، همراهی عناصر سرب، آرسنیک، کادمیم، روی و مس با P_2O_5 نشان‌دهنده خاستگاه انسانی آن‌ها به‌ویژه در اثر فعالیت‌های شهری و کشاورزی است. در آخر نیز، حضور فلز سنگین Sr همراه با اکسیدهای CaO، MgO و Na_2O نشان دهنده خاستگاه تبخیری این عنصر است. در واقع، استرانسیم در ساختار بلوری کانی‌های تبخیری چون سنگ گچ و کانی‌های کربناتی آراگونیت، کلسیت و دولومیت در رسوب دریاچه غنی شده است. بنابراین خاستگاه این عنصر را می‌توان به سازندهای کربناتی و تبخیری منطقه به ویژه سازند ساچون نسبت داد.

مراجع

[1] Leorri E., Cearreta A., Irabien, M. J., Yusta I., *" Geochemical and microfaunal proxies to assess environmental quality conditions during the recovery process of a heavily polluted estuary: the Bilbao estuary case (N. Spain)"*, Science of the total environment, 396 (2008) 12-27.

[2] Arnous M.O., Hassan M. A.,*"Heavy metals risk assessment in water and bottom sediments of the eastern part of Lake Manzala, Egypt, based on remote sensing and GIS"*, Arabian Journal of Geosciences, 8(10) (2015) 7899-7918.

[3] Li Q., Liu E., Zhang E., Li K., Shen, J., *"Spatial distribution, contamination and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Erhai Lake, a large eutrophic plateau lake in southwest China"*, Catena, 145(2016) 193-203.

[4] Özmen H., Külahçı F., Çukurovalı A., Doğru M., *"Concentrations of heavy metal and radioactivity in surface water and sediment of Hazar Lake (Elazığ, Turkey)"*, Chemosphere, 55(3) (2004) 401-408.

[5] Tariq J., Jaffar M., Ashraf M., *"Levels of selected heavy metals in commercial fish from five freshwater lakes, Pakistan"*, Toxicological & Environmental Chemistry, 33(1-2) (1991) 133-140.

[6] Ke X., Gui S., Huang H., Zhang H., Wang C., Guo W, *"Ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediment from the Liaohe River protected area, China"*, *Chemosphere*, *175* (2017) 473-481.

[7] Liu M., Yang Y., Yun X., Zhang M., Li Q X., Wang, J., "*Distribution and ecological assessment of heavy metals in surface sediments of the East Lake, China"*, Ecotoxicology, 23(1) (2014) 92-101

[8] Cheng S., Grosse W., Karrenbrock F., Thoennessen M., *"Efficiency of constructed wetlands in decontamination of water polluted by heavy metals"*, Ecological engineering, 18(3) (2002) 317-325.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1398.27.4.5.4]
[DOI: 10.29252/ijcm.27.4.795]

[DOR: 20.1001.1.17263689.1398.27.4.5.4]

[DOI: 10.29252/ijcm.27.4.795]

[9] Selinus O., Alloway B. J., *"Essentials of medical geology",* New York, NY, USA:: Springer(2013).

[10] Birch G. F., Taylor S. E., Matthai C., *"Small-scale spatial and temporal variance in the concentration of heavy metals in aquatic sediments: a review and some new concepts",* Environmental Pollution, 113(3) (2001) 357-372.

[11] Xiao R., Bai J., Huang L., Zhang H., Cui B., Liu X., *"Distribution and pollution, toxicity and risk assessment of heavy metals in sediments from urban and rural rivers of the Pearl River delta in southern China",* Ecotoxicology, 22(10) (2013)1564-1575.

[12] Vu C. T., Lin C., Shern C. C., Yeh G., Tran H. T., *"Contamination, ecological risk and source apportionment of heavy metals in sediments and water of a contaminated river in Taiwan",* Ecological indicators, 82 (2017) 32-42.

[13] Long E. R., Macdonald D. D., Smith S. L., Calder F. D., *"Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments"*, Environmental management, 19(1) (1995) 81-97.

[14] Nemati K., Bakar N. K. A., Abas M. R. B., Sobhanzadeh E., Low K. H., *"Comparison of unmodified and modified BCR sequential extraction schemes for the fractionation of heavy metals in shrimp aquaculture sludge from Selangor, Malaysia"*, Environmental monitoring and assessment, 176(1-4) (2011) 313-320.

[15] Varol M., *"Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River (Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques"*, Journal of Hazardous Materials, 19 (2011) 355-364.

[16] Dinelli E., Cortecci G., Lucchini F., Zantedeschi E., *"Sources of major and trace elements in the stream sediments of the Arno river catchment (northern Tuscany, Italy)",* Geochemical Journal, 39(6 (2005) 531-545.

[17] Sindern S., Tremöhlen M., Dsikowitzky L., Gronen L., Schwarzbauer J., Siregar, T. H., Irianto, H. E., *"Heavy metals in river and coast sediments of the Jakarta Bay region (Indonesia)", Geogenic versus anthropogenic sources"*, Marine pollution bulletin, 110(2) (2016) 624-633.

[18] El Azhari A., Rhoujjat, A., El Hachimi M. L., Ambrosi J.P., *"Pollution and ecological risk assessment of heavy metals in the soil-plant system and the sediment-water column around a former Pb/Zn-mining area in NE Morocco",* Ecotoxicology and environmental safety, 144 (2017)464-474.

[19]Alavi M., *"Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations"*, Tectonophysics, 229(3) (1994) 211-238.

[20] Faghih A., Samani B., Kusky T., Khabazi S., Roshanak R., *"Geomorphologic assessment of relative tectonic activity in the Maharlou Lake Basin, Zagros Mountains of Iran".* Geological Journal, 47(1) (2012) 30-40.

[21] NIOC.*," Exploration and production affairs-National Iranian Oil Company, Geological Quadrangle map of Iran No.G-11 (Shiraz quadrangle 1:250,000 Quadrangle",* National Iranian Oil Company, Tehran (1979).

[22] Taylor S. R., McLennan S. M., *"The continental crust: its composition and evolution",* (1985).

[23] Förstner U., Wittmann G. T., *"Metal pollution in the aquatic environment"*, Springer Science & Business Media, (1981).

[24] Muller G., *"Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River",* (1969)

[25] MacDonald D. D., Ingersoll C. G., Berger T. A., *"Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems"*, Archives of environmental contamination and toxicology, 39(1) (2000)20-31.

[26] Liu S., Zhang Y., Bi S., Zhang X., Li X., Lin M., Hu G., *"Heavy metals distribution and environmental quality assessment for sediments off the southern coast of the Shandong Peninsula, China",* Marine pollution bulletin, 100(1) (2015)483-488.

[27] de Vallejuelo S. F. O., Arana G., de Diego A., Madariaga J. M., *"Risk assessment of trace elements in sediments: the case of the estuary of the Nerbioi–Ibaizabal River (Basque Country)",* Journal of Hazardous Materials, 181(1) (2010) 565-573.

[28] Hou D., He J., Lü C., Ren L., Fan Q., Wang J., Xie Z., "*Distribution characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals (Cu, Pb, Zn, Cd) in water and sediments from Lake Dalinouer, China",* Ecotoxicology and environmental safety, 93(2013) 135-144.

[33] Moore F., Attar A., Rastmanesh F., *"Anthropogenic sources of heavy metals in deposited sediments from runoff and industrial effluents, Shiraz, SW Iran"*, International Proceedings of Chemical, Biological & Environmental Engineering, 6(2011) 215-219.

[34] Arnous M. O., Hassan, M. A., *"Heavy metals risk assessment in water and bottom sediments of the eastern part of Lake Manzala, Egypt, based on remote sensing and GIS",* Arabian Journal of Geosciences, 8(10) (2015) 7899-7918.

[35] Arzaghi S., Khosrow-Tehrani K., Afghah M., *"Sedimentology and petrography of Paleocene–Eocene evaporites: the Sachun Formation, Zagros Basin, Iran"*, Carbonates and Evaporites, 27(1) (2012)43-53.

[36] Shabafrooz R., Mahboubi A., Moussavi-Harami R., *"Dolomitization and evaporate mineralization of Sachun Formation at type locality (SE Shiraz)"*, Iranian Journal of Crystallography and mineralogy, 17(4) (2010) 609-620.

[29] Pedersen F., Bjørnestad E., Andersen H. V., Kjølholt J., Poll, C., *"Characterization of sediments from Copenhagen Harbour by use of biotests",* Water Science and Technology, 37(6-7) (1998)233-240.

[30] Hakanson L., *"An ecological risk index for aquatic pollution control, A sedimentological approach",* Water research, 14(8) (1980) 975-1001.

[31] Harami M. R., Mahboudi A., Reaisi E., Ahmadi, A., *"The study of the causes of grain size variations toward downstream and source of fine grain sediments in the Khoshk River drainage basin in Shiraz",* In Proceeding of the 21st symposium on geosciences, geological survey of Iran, Tehran, Iran (in Farsi), (2003) 17–19

[32] Salati S., Moore F., *"Assessment of heavy metal concentration in the Khoshk River water and sediment, Shiraz, Southwest Iran",* Environmental monitoring and assessment, 164(1) (2010) 677-689.